

文波, 杨金熹. 地下变电站地震易损性及可恢复性分析 [J]. 灾害学, 2020, 35 (3): 13 – 19. [WEN Bo and YANG Jinxi. Seismic Fragility and Resilience Analysis of Underground Substation [J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35 (3): 13–19. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.03.003.]

地下变电站地震易损性及可恢复性分析^{*}

文 波^{1,2}, 杨金熹^{1,2}

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055;
2. 西安建筑科技大学 结构工程与抗震教育部重点实验室, 陕西 西安 710055)

摘要: 为了合理评估地下变电站的地震易损性及可恢复性, 以西安市张家堡地下变电站为工程背景, 建立考虑土体-结构-电气设备动力相互作用的三维有限元计算模型。根据结构场地条件选取多组合理的地震动记录, 分别以地面峰值加速度和剪力墙塑性位移角作为地震动参数和结构地震需求参数, 通过增量动力分析得到结构的易损性曲线, 并在此基础上对结构的可恢复性进行分析。研究结果表明, 地下变电站在总体上拥有较好的抗震安全性和较为充足的抗震储备, 但是当其处于严重破坏状态时, 结构的剩余抗震能力不足, 导致大震作用下结构的倒塌概率超出规范要求, 因此有必要对结构的抗倒塌能力进行加强。

关键词: 地下变电站; 地震易损性曲线; 可恢复性; 增量动力分析; 性能评估

中图分类号: TU923; X43; X915.5; P315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2020)03-0013-07
doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.03.003

地下变电站主要为地铁、轻轨以及大型商业综合体等基础设施和公共建筑供电, 是现代城市的生命线工程之一。确保地下变电站在地震等自然灾害下的安全稳定, 对于保障城市正常运行、灾后应急救援及恢复重建具有重要意义。过去普遍认为相较于地面建筑, 地下建筑由于受到周围土体或岩石的约束作用, 应具有较好的抗震安全性^[1]。但近年来的震害研究表明, 地下建筑在强震作用下可能会出现严重的震害及次生灾害, 并且其一旦受损, 修复难度较大, 由此造成的直接和间接经济损失较为严重^[2]。鉴于过去地下结构的抗震设防标准偏低、抗震设计理论尚不完善, 地下建筑的抗震能力不足, 为了合理评估其抗震性能, 有必要对地下建筑尤其是地下变电站等生命线工程进行地震易损性及可恢复性研究。

目前结构的地震易损性研究大多集中于结构形式较为复杂的地面建筑^[3-4], 而有关地下建筑的地震易损性研究十分有限。由于周围土体或岩石的存在, 地下建筑在地震作用下的位移响应总体上相比地面建筑偏小, 动力特性也与地面建筑存在显著差异, 因此在对地下建筑进行地震易损性分析时不能简单沿用地面建筑的评价标准。Jung-won 等^[5]通过对地下箱型结构在横向集中荷载和分布荷载下的地震反应特性, 提出了一种基于准静态条件的易损性分析方法。王文晖^[6]在地铁地

下结构地震破坏机理研究的基础上, 将其结构的抗震性能水平划分为四个等级并分别给出了相应性能水平的层间位移角限值。何志明等^[7]将结构柱作为损伤指标, 对地下框架结构的地震易损性进行了分析。

可恢复性的概念来源于生态学, 指系统受到干扰而发生变化, 经历短暂波动后恢复稳定的一种能力。Bruneau 与 Cimellaro 等^[8-9]将可恢复性的概念引入到工程结构抗震领域, 用来评价结构在地震等自然灾害作用下维持或恢复自身功能的能力。何政等^[10]研究了一般钢筋混凝土框架结构的地震损伤程度与抗震承载力衰减速度, 针对不同重要性和损伤程度的结构给出了可恢复性指标变化范围的建议值。徐积刚等^[11]考虑了近场地震的不利作用及恢复因素的不确定性, 对中低层混凝土框架结构的抗震可恢复性进行了分析与评价。

综上所述, 虽然目前关于结构地震易损性和可恢复性的研究取得了一定的成果, 但是对于地下结构的地震易损性及可恢复性的研究较少, 已有研究尚不足以指导地下变电站的抗震设计和评估。因此, 为进一步了解地下变电站的抗震性能和灾后恢复能力, 以西安市张家堡地下变电站为工程背景, 结合增量动力分析法^[12]对结构的地震易损性及可恢复性进行研究, 以期为有关地下变电站的地震风险评估及维修加固提供参考。

* 收稿日期: 2019-12-08 修改日期: 2020-01-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578450); 陕西省国际合作项目(2019KW47); 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资金资助项目(2020EEEVLO415)

第一作者简介: 文波(1975-), 女, 陕西西安人, 教授, 博士, 主要从事建筑结构抗震与抗火研究. E-mail: wenbo-mail@163.com

1 地震易损性及可恢复性分析方法

1.1 地震易损性分析方法

结构地震易损性表示结构在不同强度的地震作用下达到或超过其性能极限状态的超越概率。

$$P_f = P(R \geq r_{lim} + IM)。 \quad (1)$$

式中: R 为结构响应参数, r_{lim} 为极限状态界限值, IM 为地震动参数。

对结构进行地震易损性分析需要首先建立结构的地震需求模型, 即建立地震需求参数(EDP)与地震动参数(IM)的关系。文献[13]指出, 地震需求参数与地震动参数服从指数分布:

$$EDP = \alpha(IM)^\beta。 \quad (2)$$

式中: α 、 β 为指数分布的系数。假设地震需求参数的中位数 \hat{D} 与地震动参数 IM 的关系与上式相同, 在等式的两边分别取对数, 即可将得到线性方程:

$$\ln \hat{D} = a + b \ln(IM)。 \quad (3)$$

式中: $a = \ln \alpha$, $b = \beta$ 。上述线性方程可以通过回归分析结构地震响应数据获得。

假设结构响应参数与其极限状态界限值均为随机变量且均服从对数正态分布, 取结构功能函数 $Z = \ln(r_{lim}/R)$, 则结构达到极限状态的超越概率为:

$$P_f = \phi\left(-\frac{\mu_z}{\sigma_z}\right)\phi\left(\frac{\ln \mu_R - \ln \mu_{r,lim}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_{r,lim}^2}}\right)。 \quad (4)$$

式中: $\Phi(x)$ 为标准正太分布函数, μ_R 和 σ_R 分别为结构响应参数的均值和对数标准差, $\mu_{r,lim}$ 和 $\sigma_{r,lim}$ 分别为结构抗震能力的均值和对数标准差。

1.2 地震可恢复性分析方法

结构地震可恢复性表示结构在受到一定程度的损伤后, 其抗震性能恢复到初始状态的能力。由于结构抗震性能的优劣可以由其所能承受的地震强度大小较为直观的体现, 因此本文以能使结构达到倒塌临界状态的地震动强度值描述其极限抗震能力。

为了定量描述结构的抗震性能冗余情况, 将结构在特定损伤状态下的剩余抗震能力与其在完好时的抗震能力之比定义为结构剩余抗震能力比, 即:

$$C(D) = \frac{IM_{c,D}}{IM_c}。 \quad (5)$$

式中: $C(D)$ 表示结构在损伤 D 状态下的剩余抗震能力比, $IM_{c,D}$ 表示结构在受到特定损伤 D 状态下的倒塌地震动强度, IM_c 表示结构完好时的倒塌地震动强度。

采用增量动力分析法, 可以得到结构在所有损伤状态下的剩余抗震能力比, 从而形成一条随

损伤累积而衰减的曲线, 即结构剩余抗震能力曲线, 其示意图如图 1 所示。

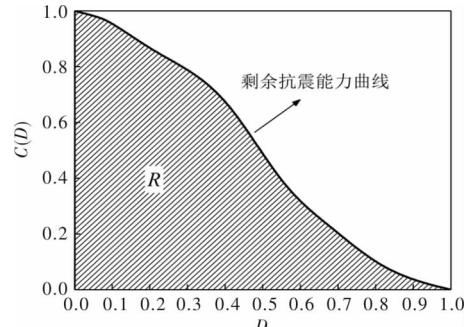


图 1 结构剩余抗震能力曲线

由图 1 可以看出, 结构剩余抗震能力比 $C(D)$ 与损伤 D 之间的关系曲线往往具有非线性的特点, 曲线的变化与诸多因素相关, 如施工工艺与安装过程、材料的性能、结构的类型以及地震波的频谱特征等。为了量化结构的剩余抗震能力, 引入结构整体抗震可恢复性指标 R :

$$R = \int_0^1 C(D) dD。 \quad (6)$$

上式定义的结构整体抗震可恢复性指标 R 表示结构从完好到倒塌过程中抗震能力剩余比曲线的积分, 即图 1 中阴影部分的面积。若结构损伤发展与其抗震能力的衰减成线性关系, 则曲线将呈一条倾斜的直线, 此时 $R = 0.5$ 。因此当 $R > 0.5$ 时, 可以认为结构抗震能力的衰减总体上小于损伤的积累, 结构拥有较为充足的抗震储备。

为了便于对结构进行抗震分析和评估, 在实际工程的设计与研究中, 一般将结构的损伤程度划分为基本完好、轻微破坏、中度破坏、严重破坏和倒塌 5 个等级^[14]。因此, 为了进一步了解结构在不同损伤状态下的剩余抗震能力, 定义结构阶段抗震可恢复性指标 R_{DSi} , 其表达式见式(7), 示意图如图 2 所示。

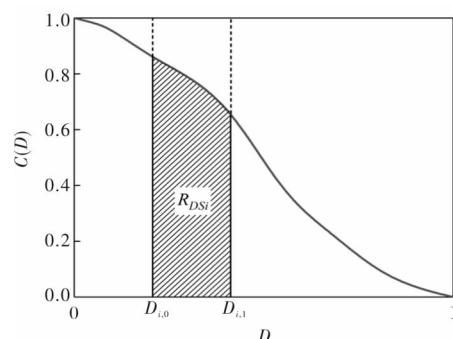


图 2 结构阶段抗震可恢复性指标

$$R_{DSi} = \frac{\int_{D_{i,0}}^{D_{i,1}} C(D) dD}{D_{i,1} - D_{i,0}}。 \quad (7)$$

式中: $D_{i,0}$ 和 $D_{i,1}$ 分别表示第 i 个损伤区间对应的损

伤指数前后界限值。

由图2可以看出, 结构阶段抗震可恢复性指标 R_{DSi} 表示图中阴影面积与该区间总面积的比值, 该指标可以反应结构在特定损伤状态下的抗震能力剩余情况。

2 有限元分析模型

2.1 工程概况

以西安市城市快速轨道交通二号线张家堡地下变电站为工程背景, 该地下变电站主体为三层全埋式框架-剪力墙结构, 建筑抗震设防类别为乙类。结构平面尺寸为 $50\text{ m} \times 26.5\text{ m}$, 高度为 14.7 m 。地下一层层高为 5.1 m , 地下二层和三层层高均为 4.8 m , 剪力墙厚度为 0.8 m , 框架柱截面尺寸为 $0.6\text{ m} \times 0.6\text{ m}$, 楼板厚度为 0.4 m , 上覆土层厚度为 2 m , 建筑场地类别为Ⅱ类。结构中的混凝土材料均采用C30混凝土, 钢筋均采用HRB335级钢筋。地下结构负二层安装有两组 110 kV GIS电气设备, 每组包括四个电缆进出线间隔(GIS-1)和一个套管进出线间隔(GIS-2), GIS电气设备相关技术参数见表1, 地下变电站结构布置图如图3所示。

表1 GIS电气设备技术参数

| 技术参数 | GIS-1(电缆 进出线间隔) | GIS-2(套管 进出线间隔) |
|---------|-----------------------------|----------------------------|
| 结构尺寸/m | $7.2 \times 1.5 \times 4.9$ | $15 \times 1.5 \times 5.6$ |
| 壳体壁厚/mm | 20 | 20X |
| 外壳材质 | 铝 | 铝 |
| 单体质量/t | 8.6 | 11 |

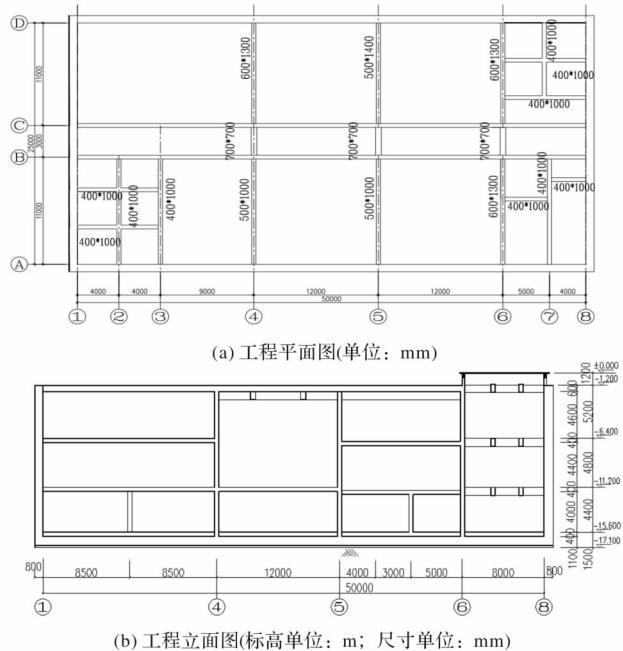


图3 地下变电站结构布置图

2.2 有限元模型

采用ABAQUS有限元软件建立土体-地下变电站结构-电气设备动力相互作用体系的三维模型, 如图4所示。地基土模型尺寸取 $150\text{ m} \times 80\text{ m} \times 45\text{ m}$, 土体参数见表2。在进行地下结构的地震动力分析时, 不可避免会遇到无限地基如何模拟的问题。目前普遍采用的解决方法是从无限地基中截取有限范围的近场计算区, 在计算区内用有限元等数值方法将场方程和物理边界条件转化为时空离散的运动方程, 使对波动的模拟转化为数学代数运算, 从而实现对地震作用的数值模拟^[15]。在各种人工边界理论中, 粘弹性人工边界^[16]因其良好的鲁棒性和较为简单的设置方法, 在理论研究和实际工程中得到广泛应用, 其示意图如图5所示。

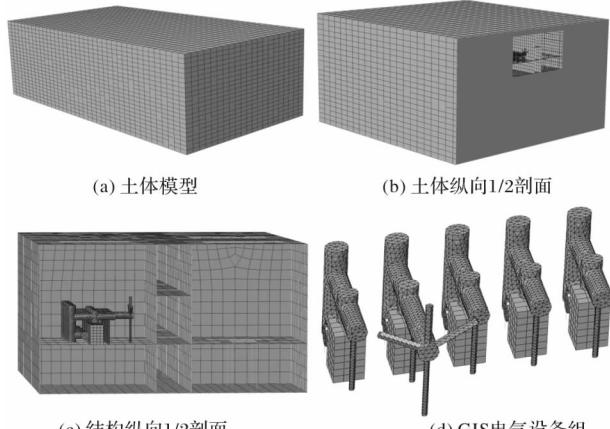


图4 土体-结构-设备相互作用体系有限元模型

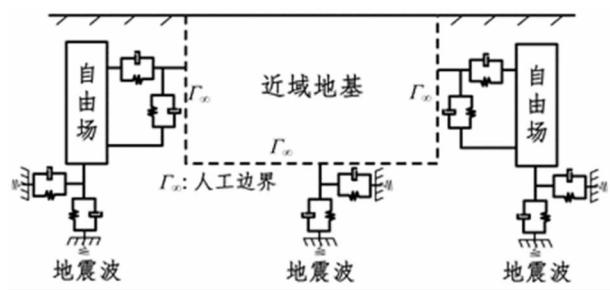


图5 粘弹性人工边界

表2 土体参数

| 土类 | 密度 $/(\text{kg}/\text{m}^3)$ | 剪切波速 $/(\text{m}/\text{s})$ | 泊松比 | 厚度 $/\text{m}$ |
|------|---------------------------------|---------------------------------|------|-------------------|
| 素填土 | 1720 | 240.81 | 0.39 | 4.30 |
| 新黄土 | 1600 | 317.74 | 0.30 | 6.20 |
| 粉质黏土 | 1950 | 321.79 | 0.30 | 1.70 |
| 卵石 | 2250 | 508.04 | 0.15 | 2.10 |
| 粉质黏土 | 1950 | 321.79 | 0.30 | 27.0 |
| 粗砂 | 1920 | 504.88 | 0.26 | 4.50 |

在土体的四周和底面设置三维粘弹性人工边

界，使用“硬接触”模拟结构与地基土接触面的法向作用，即考虑地基土-地下结构接触面之间的接触和分离，接触面在接触状态下才能传递法向压力，当接触面间出现缝隙时法向压力消失。使用摩擦接触模拟接触面间的切向作用，摩擦系数取0.22。为提高计算效率，地下变电站结构的楼板、剪力墙采用壳单元模拟，梁和柱采用梁单元模拟；GIS电气设备主体及套管部分采用壳单元模拟，底部支架采用梁单元模拟，开关柜采用实体单元模拟。

3 地下变电站地震易损性分析

3.1 输入地震波的选取

为考虑地震动的不确定性，从美国太平洋地震研究中心(PEER)强震数据库选取了15条地震记录，所选地震记录相关信息见表3，加速度反应谱曲线如图6所示。将每个地震记录进行调幅，产生地面峰值加速度分别为0.1 g、0.2 g、0.4 g、0.6 g、0.8 g、1.0 g及1.2 g的7组共105条地震加速度记录作为易损性分析的输入地震动。

表3 所选地震记录信息

| 序号 | 地震名称 | 记录台站 | 年份 | 矩震级 |
|----|--------------------|---------------------|------|------|
| 1 | Taft | Taft Lincoln School | 1952 | 7.36 |
| 2 | Southern Calif | San Luis Obispo | 1952 | 6.0 |
| 3 | Imperial Valley-05 | El Centro Array #9 | 1955 | 5.4 |
| 4 | Northern Calif-04 | Ferndale City Hall | 1960 | 5.7 |
| 5 | San Fernando | Hemet Fire Station | 1971 | 6.61 |
| 6 | El Centro | El Centro Array #1 | 1979 | 6.53 |
| 7 | Nahanni | Site 3 | 1985 | 6.76 |
| 8 | Loma Prieta | Dublin-Fire Station | 1989 | 6.93 |
| 9 | Cape Mendocino | Eureka-Myrtle&West | 1992 | 7.01 |
| 10 | Landers | Boron Fire Station | 1992 | 7.28 |
| 11 | Northridge | Elizabeth Lake | 1994 | 6.69 |
| 12 | Kobe | FUK | 1995 | 6.9 |
| 13 | Duzce | Galata Kop. | 1999 | 7.14 |
| 14 | Kocaeli | Afyon Bay | 1999 | 7.51 |
| 15 | Chi-Chi | CHY016 | 1999 | 6.2 |

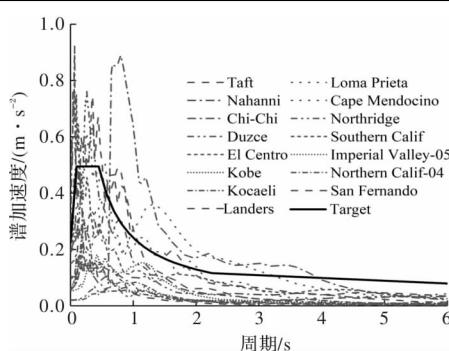


图6 所选地震波反应谱

3.2 性能指标的确定与极限状态的划分

基于性能的结构地震易损性分析方法要求结构在不同的性能目标下有不同的破坏状态。因此，选择合理的结构性能指标是易损性分析的基础。文献[17]通过对地下结构震害资料的调查研究后发现，大震后结构竖向构件的损伤最为严重。由于剪力墙是地下变电站结构的主要抗侧力和竖向承载构件，其变形能力直接影响其结构的抗震安全性，因此本文采用剪力墙塑性位移角($\theta_{shear\ wall}$, θ_{sw})作为结构的性能指标，通过增量动力分析得到结构地震响应的IDA曲线(如图7)。

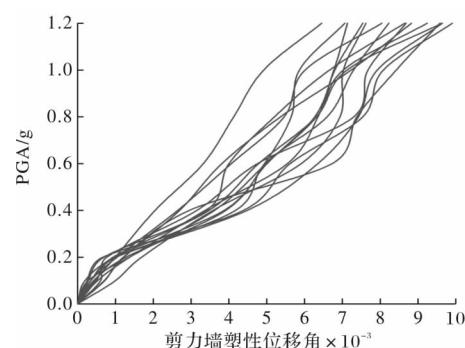


图7 结构 IDA 曲线

为了解地下变电站内剪力墙的变形能力，对结构进行了pushover分析，得到剪力墙的变形能力曲线如图8所示，图中 θ_y 表示比例极限， θ_p 表示屈服极限， θ_u 表示变形极限。由于我国抗震规范暂无对剪力墙塑性位移角的规定，因此本文参考美国规范FEMA 356^[18]并结合国内的研究和工程经验^[19-20]，设定剪力墙塑性位移角限值如表4所示。

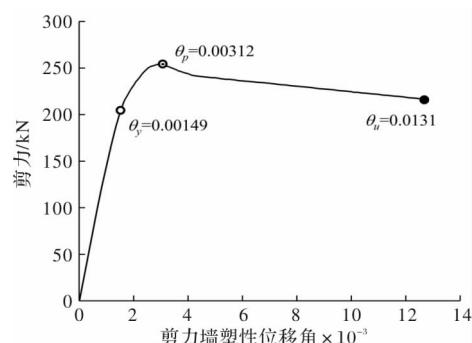


图8 剪力墙变形能力曲线

表4 剪力墙塑性位移角限值

| 性能水平 | 正常使用 | 可以使用 | 生命安全 | 防止倒塌 |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|
| 塑性位移角 θ_{sw} | 0.001 | 0.003 | 0.006 | 0.009 |

3.3 地震易损性分析

本文参照我国建筑抗震设计规范，将地下变电站的抗震性能水平划分为基本完好、轻微破坏、中度破坏、严重破坏和倒塌五个等级，分别对应

正常使用、可以使用、生命安全和防止倒塌四种性能极限状态。假设地震动强度与结构响应服从对数正态分布, 对增量动力分析所得的数据取对数并进行线性回归, 得到地下变电站地震需求模型(图9)。根据地震需求模型和表4确定的性能限值, 利用式(4)计算结构达到极限状态的超越概率, 得到结构的易损性曲线(图10)。

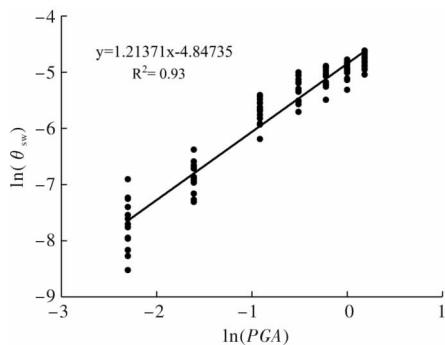


图9 地震需求模型

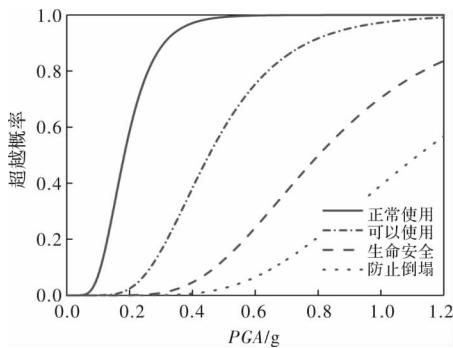


图10 地震易损性曲线

由图10可知, 随着PGA的增大, 四种极限状态对应的超越概率逐渐增大。当PGA小于0.1 g时, 地下变电站结构发生轻微破坏的概率小于0.2, 其他破坏等级概率趋于零, 基本处于安全状态; 当PGA大于0.8 g时, 地下变电站结构严重破坏的概率超过0.5, 并存在倒塌的风险。同时可知, 发生Ⅷ度罕遇地震($PGA = 0.40\text{ g}$)时, 结构发生轻微破坏的概率约为0.97, 中度破坏的概率约为0.38, 结构的使用功能受到一定影响, 但经简单修理后可继续使用; 发生Ⅸ度罕遇地震($PGA = 0.62\text{ g}$)时, 结构发生中度破坏的概率约为0.78, 发生严重破坏的概率约为0.27, 存在一定安全隐患, 有关部门应该提前做好防灾减灾措施。

4 地下变电站抗震可恢复性分析

4.1 抗震可恢复性指标及剩余抗震能力曲线

根据上文增量动力分析所得到的数据, 利用

式(5)、式(6)和式(7)分别计算出所有地震记录对应的结构剩余抗震能力曲线、整体可恢复性指标阶段可恢复性指标。限于篇幅, 本文只列出在El Centro波作用下的计算结果, 如图11所示, 其他地震条件下得到的结果与此类似。由图11可以看出结构整体抗震可恢复性指标 $R = 0.507$, 略大于0.5, 说明地下变电站结构具有较好的抗震可恢复性。同时可知, 随着结构损伤程度的增大, 其抗震能力逐渐下降。当损伤 D 小于0.6时, 曲线呈现外凸特性, 说明此时结构抗震能力的衰减小于损伤积累, 结构具有延性; 随着结构损伤程度的增加, 当损伤 D 大于0.6时, 结构抗震能力的衰减大于损伤累积, 曲线呈现下凹特性, 此时结构由于前期大量损伤的积累导致变形能力不足, 其破坏形式偏向于脆性破坏。

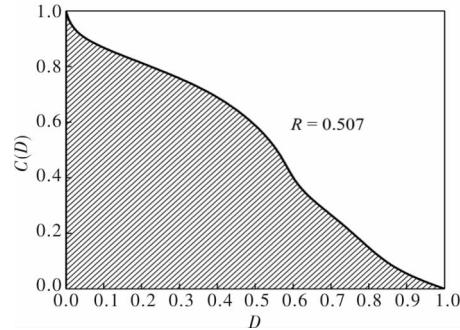


图11 地下变电站结构剩余抗震能力曲线

为了解结构在特定损伤阶段的抗震可恢复性, 根据文献^[10]建议的损伤区间界限值(0.1、0.25、0.5和1.0)计算地下变电站结构的阶段抗震可恢复性指标(如图12)。由图12可以看出地下变电站结构在不同损伤区间的抗震可恢复性衰减情况。当结构处于基本完好状态(DS_1)时, 对应的剩余抗震能力为0.942, 这意味着该状态下结构拥有充足的抗震储备, 能够抵抗地震作用带来的不利影响; 当结构处于严重破坏状态(DS_4)时, 对应的剩余抗震能力仅为0.205, 这意味着该状态下结构几乎失去了抗震能力, 无法继续抵御后面可能发生的余震作用, 结构濒临破坏。

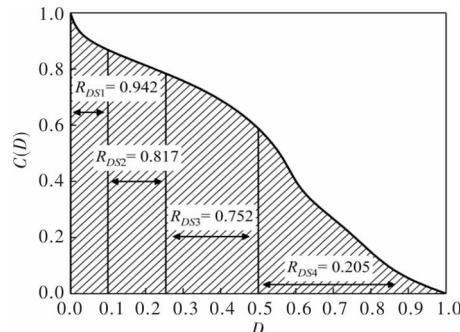


图12 地下变电站结构阶段抗震可恢复性指标

4.2 设计大震下结构剩余抗震能力比期望值

由于结构抗震可恢复性指标没有体现地震动参数,因而不能直接用于验算结构的抗震可恢复性。为了能在概率意义上对特定地震动强度下的结构可恢复性进行评价,需要根据易损性分析结果计算出特定地震动强度下结构各级损伤发生的概率 $P(D_i)$, 计算公式见式(8), 示意图见图13。

$$P(D_i) = \begin{cases} 1 - P(DS_{i+1}), & i = 1; \\ P(DS_1) - P(DS_{i+1}), & 1 < i < 5; \\ P(DS_i), & i = 5. \end{cases} \quad (8)$$

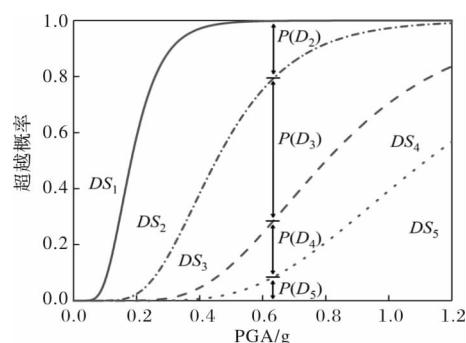


图13 易损性曲线与损伤概率的关系

将结构各级损伤发生的概率与该阶段抗震可恢复性指标 R_{DS_i} 相结合, 可以得到结构在特定地震动强度下其剩余抗震能力比的期望值 E_M :

$$E_M = \sum_{i=1}^4 P(D_i) \cdot R_{DS_i} \quad (9)$$

该期望值可以用来验算特定地震强度下结构的剩余抗震能力。

根据式(8)计算IX度罕遇地震作用下地下变电站结构各损伤等级的发生概率, 计算结果见表5。可以看出, 在设计大震作用下, 结构处于中度破坏状态的概率较大, 约为 51.07%; 同时, 结构发生倒塌的概率约为 7.58%, 大于文献[21]规定的大震倒塌率 5% 的要求, 因此有必要对地下变电站结构的抗倒塌能力进行加强。根据式(9)计算得到结构的剩余抗震能力比期望值 $E_M = 0.605$, 表明在设计大震作用下, 地下变电站结构在总体上拥有较为充足的抗震储备。

表5 罕遇地震作用下各损伤等级发生概率

| 损伤阶段 | 阶段抗震可恢复性指标 | 发生概率/% |
|------|------------|--------|
| 基本完好 | 0.942 | 0.154 |
| 轻微破坏 | 0.817 | 22.115 |
| 中度破坏 | 0.752 | 51.072 |
| 严重破坏 | 0.205 | 19.082 |
| 倒塌 | 0 | 7.578 |

5 结论

本文以西安市张家堡地下变电站为工程背景, 建立考虑土体-结构-设备动力相互作用的三维有限元模型。根据结构场地条件选择多组合理的地震动记录, 分别以地面峰值加速度和剪力墙塑性位移角作为地震动参数和结构地震需求参数, 结合增量动力分析对地下变电站结构的地震易损性和可恢复性进行了探讨。研究得出的主要结论如下:

(1) 本文对地下变电站结构的性能指标进行了初步的探索, 从构件层面提出了基于剪力墙塑性位移角的评价标准和依据, 其适用性得到了有限元模拟的验证, 但其准确性仍需地震实测数据的支持。

(2) 地下变电站结构的地震易损性评价结果显示, 在遭遇Ⅷ度罕遇地震时, 结构发生轻微破坏的概率约为 0.97, 中度破坏的概率约为 0.38, 因此该结构能够保证设计大震下的安全性。

(3) 地下变电站结构的抗震可恢复性研究结果表明, 虽然该结构在总体上拥有较为充足的抗震储备, 但是其在严重破坏状态下的剩余抗震能力不足, 导致大震作用下结构的倒塌概率超出规范要求, 因此有必要对结构的抗倒塌能力进行加强。

参考文献:

- [1] 杜修力, 康凯丽, 徐紫刚, 等. 地下结构地震反应的主要特征及规律[J]. 土木工程学报, 2018, 51(7): 11-21.
- [2] 陈国兴, 陈苏, 杜修力, 等. 城市地下结构抗震研究进展[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(1): 1-23.
- [3] Bhandari M, Bharti S D, Shrimali M K, et al. Seismic fragility analysis of base-Isolated building frames excited by near-and far-field earthquakes[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2019, 33(3): 04019029.
- [4] 刘杨, 李宏男, 李超, 等. 风与地震耦合作用下钢管混凝土框架-防屈曲支撑结构体系易损性研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(2): 56-65.
- [5] Jungwon H, Quang H T, Achintya H, et al. Seismic vulnerability assessment of a shallow two-story underground RC box structure [J]. Applied Science, 2017, 7(7): 735.
- [6] 王文晖. 地下结构实用分析方法及性能指标研究[D]. 北京: 清华大学, 2013.
- [7] HE Z M, CHEN Q J. Vertical seismic effect on the seismic fragility of large-space underground structures[J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 9650294: 1-17.
- [8] Bruneau M, Reinhorn A M. Exploring the concept of seismic resilience for acute care facilities[J]. Earthquake Spectra, 2007, 23(1): 41-62.
- [9] Cimellaro G P, Reinhorn A M, Bruneau M. Framework for analytical quantification of disaster resilience[J]. Engineering Struc-

- tures, 2010, 32(11): 3639-3649.
- [10] 何政, 宁安, 徐菁菁. 考虑损伤的结构抗震可恢复性[J]. 工程力学, 2017, 34(5): 179-187.
- [11] 徐积刚, 吴刚, 汤昱川, 等. 近场地震下混凝土框架考虑不确定性的抗震风险与恢复性评估[J]. 土木工程学报, 2019, 52(10): 46-55.
- [12] Mohammadi A, Azizinamini A, Griffis L, et al. Performance assessment of an existing 47-story high-rise building under extreme wind loads [J]. Journal of Structural Engineering, 2019, 145(1): 04018232.
- [13] Cornell C A, Jalayer F, Hamburger R O, et al. Probabilistic basis for 2000 SAC federal emergency management agency steel moment frame guidelines [J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(4): 526-533.
- [14] GB 50011-2010 建筑结构抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [15] Bipin K G, Dipanjan B. Timoshenko beam theory-based dynamic analysis of laterally loaded piles in multilayered viscoelastic soil[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2018, 144(9): 04018091.
- [16] Kakar R, Kakar S. Love wave in a voigt-type viscoelastic heterogeneous layer overlying heterogeneous viscoelastic half-space[J]. International Journal of Geomechanics, 2017, 17(1): 06016009.
- [17] 朱纹军. 土-地下车库-上部结构相互作用体系地震易损性研究[J]. 建筑结构, 2017, 47(S1): 546-550.
- [18] FEMA 356. Pre-standard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings[S]. Washington DC: Federal Emergency Management Agency, 2000.
- [19] 季静, 肖新瑜, 崔济东, 等. 基于变形的框架-剪力墙结构抗震安全性评估[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(S2): 62-69.
- [20] WEN B, ZHANG L, NIU D T, et al. Soil-structure-equipment interaction and influence factors in an underground electrical substation under seismic loads [J]. Applied Science, 2017, 7(10): 1044.
- [21] CECS 392-2014 建筑结构抗倒塌设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.

Seismic Fragility and Resilience Analysis of Underground Substation

WEN Bo^{1,2} and YANG Jinxi^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

(2. Key Lab of Structural Engineering and Earthquake Resistance, Ministry of Education, Xi'an 710055, China)

Abstract: As far as the Xi'an-Zhangjiabu underground substation is concerned, the seismic fragility and resilience of underground substation is analyzed. Firstly, a 3D finite element model considering soil-structure-equipment dynamic interaction is built, and a range of reasonable ground motion records are selected according to the structural site conditions. Then, taking peak ground acceleration and shear wall plastic drift ratio as seismic intensity parameter and engineering demand parameter respectively, the structural seismic fragility curves are obtained through incremental dynamic analysis. On this basis, the seismic resilience of this structure is analyzed. The results show that the underground substation generally has good seismic safety and sufficient seismic reserve. However, when the structure is in the state of serious damage, its residual seismic capacity is insufficient, which leads to its collapse probability under rare earthquake beyond the value stipulated by corresponding standard, so it is necessary to strengthen the structure's collapse resistance.

Key words: underground substation; seismic fragility curve; resilience; incremental dynamic analysis; performance assessment